

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Parní předeřřívák koksárenského plynu

Steam preheater of coke gas

Student:

Bc. David Závodský

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Ladislav Vilímeč

Ostrava 2015

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. David Závodský**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **2302T006 Energetické stroje a zařízení**
Téma: **Parní předehřívák koksárenského plynu**
Steam Preheater of Coke Gas

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši na téma koksárenský plyn a parní výměníky tepla
2. Stanovte entalpii koksárenského plynu
3. Proveďte bilanční výpočty pro obě média
4. Navrhněte schéma zapojení ohříváku
5. Proveďte tepelný výpočet ohříváku
6. Vypracujte výpočtový projekt ohříváku

Seznam doporučené odborné literatury:

DLOUHÝ, T.: Výpočty kotlů a spalinových výměníků. Skripta ČVUT Praha. ISBN 80-01-20591-8.
ČERNÝ, V. a kol.: Parní kotle, Technický průvodce 32. SNTL Praha 1983.

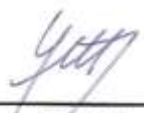
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ladislav Vilimec**


Datum zadání: 13.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015





prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

Bc. David Závodský

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomové práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. David Závodský

Adresa trvalého pobytu autora práce: Volgogradská 41, Ostrava 3, 700 30

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce doc. Ing. Ladislavovi Vilímcovi, a zaměstnanci firmy Arcelor Mittal Ing. Radkovi Tomanovi, za čas, který mi věnovali, odborně vedli a poskytli cenné rady, data a připomínky při tvorbě práce.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Tématem mé diplomové práce je návrh parního předehřívače, který slouží k ohřevu koksárenského plynu. První část práce je věnována oboru koksárenství, kde je stručně popsán provoz koksovný a koksochemie. Dále se tato část zabývá vzniklými produkty koksoven a jejich možným využitím. V části o tepelných výměnících jsou vypsány základní typy výměníku dle principu výměny tepla, konstrukce a jejich možné využití. V praktické části práce je uveden návrh parního předehřívače koksárenského plynu. Tato část obsahuje kompletní tepelný výpočet předehřívače dle zadaných parametrů. V závěrečné části práce jsou uvedeny typy regulací tepelného výkonu, které je možno aplikovat do systému parního předehřívače.

Klíčová slova: Koksárenství, koksárenský plyn, výměníky tepla, návrh parního předehřívače koksárenského plynu, regulace výkonu parního předehřívače

ANOTTATION OF DIPLOMA THESIS

Topic of my diploma thesis is design of steam preheater, which is used to warming of coke oven gas. The first part is devoted specialization of coke, in this part is conciesly desribed working of a cocking plant and cock chemistry. It also deals with products generated in a cocking plant ant using of these products. There are described basic types of exchangers, their construction and possible use in the part about heat exchangers. Practice part of thesis represents design of the steam preheater of coke oven gas. There is salso complete thermal calculation of preheater according to specified parameters. The final seciton contains types of regulations of heat output, which can be applied to the system of steam preheater.

Key words: coke, coke oven gas, heat exchangers, design of steam preheater of coke oven gas, power regulation of the steam preheater

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Koksárenství.....	12
2.1	Koksovna.....	12
2.2	Karbonizace černého uhlí.....	14
2.3	Koksochemie.....	14
2.4	Koksárenský plyn.....	15
3	Výměníky tepla.....	16
3.1	Rozdělení výměníku tepla.....	16
3.1.1	Dělení podle způsobu předávání tepla mezi medii.....	16
3.1.2	Dělení výměníků podle druhů látek.....	17
3.1.3	Dělení podle konstrukčního uspořádání.....	18
4	Zadání praktické části diplomové práce.....	18
4.1	Vstupní parametry ohřivaného média (koksárenského plynu).....	19
4.2	Vstupní parametry ohřívacích médií (Tlaková voda a sytá pára).....	19
4.2.1	Pára (ohřívací médium).....	19
4.2.2	Tlaková horká voda (ohřívací médium).....	20
5	Volba vstupních a výstupních parametrů ohřívacího a ohřivaného média.....	20
5.1	Volba parametrů ohřivaného média (koksárenského plynu).....	20
5.1.1	Fyzikální vlastnosti koksárenského plynu.....	20
5.1.2	Výpočet entalpie koksárenského plynu.....	22
5.2	Volba vhodného ohřívacího média a jeho parametrů.....	23
5.2.1	Fyzikální vlastnosti páry a kondenzátu a výpočet tepelné bilance parního předehříváče.....	23
5.2.2	Fyzikální vlastnosti horké tlakové vody a výpočet tepelné bilance horkovodního předehříváče.....	25
6	Tepelný výpočet parního předehříváče koksárenského plynu.....	27
6.1	Tepelný výpočet předehříváče na straně předehřívaného média (koksárenského plynu).....	29

6.2 Tepelný výpočet přehříváče na straně přehřívacího média (kondenzační část).....	34
6.2.1 Výpočet kondenzační části výměníku	34
6.2.2 Výpočet parní části přehříváče (ochlazování páry)	37
7 Regulace parního přehříváče	46
7.1 Regulace výkonu změnou teplotního spádu	46
7.2 Regulace výkonu parního přehříváče změnou délky teplosměnné plochy.....	48
7.3 Regulace výkonu snížením počtu trubek v přehříváči.....	50
8 Závěr	52
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	53
SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	54

Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Popis	Jednotka
p	tlak	[Pa]
ρ	hustota	$[kg \cdot m^{-3}]$
t	teplota	[°C]
\dot{m}_i	hmotnostní průtok	$[kg \cdot s^{-1}]$
\dot{V}_i	objemový průtok	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
i	entalpie	$[J \cdot kg^{-1}]$
\dot{Q}	tepelný výkon	[W]
D	vnější průměr	[m]
d	vnitřní průměr	[m]
cp	měrná tepelná kapacita	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
η	dynamická viskozita	$[N \cdot s \cdot m^{-2}]$
ν	kinematická viskozita	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
λ	tepelná vodivost	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
Pr	prandtlovo číslo	[1]
i'	latentní teplo	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
S	plocha	$[m^{-2}]$
Re	reynoldsovo číslo	[1]
w	rychlost	$[m \cdot s^{-1}]$
n_{tr}	počet trubek	[ks]
Nu	nusseltovo číslo	[1]
l	délka	[m]
ε_R	opravný součinitel pro oblouky	[1]
ε_L	opravný součinitel pro krátké trubky	[1]
ε_t	opravný součinitel pro neizoterm. proud.	[1]

Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Popis	Jednotka
α	součinitel přestupu tepla	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
k	součinitel prostupu tepla	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
$\Delta t_{stř}$	střední logaritmický teplotní spád	$[^{\circ}C]$

1 Úvod

V dnešní době má každé průmyslové odvětví snahu o co nejefektivnější a nejekonomičtější provoz svých zařízení. To samé platí i u koksoven. Ty musí být pro svůj co nejekonomičtější provoz v nepřetržitém výrobním procesu, kdy primární produkovanou surovinou je koks a sekundární surovinou je koksárenský plyn, který je využíván jako otopné médium pro koksárenské baterie. Podmínka plynulého provozu zde většinou není dodržena, protože se zde jako u každého průmyslového zařízení čas od času vyskytují technické problémy, spojené s nutným odstavením zařízení.

Jedním z příkladů technických potíží u koksoven bývá zanášení potrubního systému koksárenského plynu tuhými usazeninami, které vznikají zkondenzováním složek obsažených v koksárenském plynu. Jsou to naftalen a dehet. Tyto usazeniny vznikají vlivem podkročení rosného bodu těchto látek. Postupné ucpávání potrubního systému má dopad na kontinuální dopravu otopného média k hořákům koksovací pece, což vede k nerovnoměrnému ohřevu topných stěn a výrazně se tím snižuje kvalita koksovacích produktů, což je z ekonomického hlediska nežádoucí. Tento problém je odstraňován pracným, finančně náročným a z časového hlediska zdlouhavým ručním čištěním vzniklých usazenin. Proto se hledá způsob jak zabránit vzniku těchto nánosů.

Ve své diplomové práci se zabývám návrhem vhodného výměníku tepla, který by byl aplikován do potrubního systému a zvyšoval tak teplotu koksárenského plynu nad rosný bod složek, které vytváří nánosy v potrubí. Těžištěm této práce je celkový výpočet výměníku tepla dle vstupních parametrů. Parametry jsou dány zadavatelem, kterým je firma Arcelor Mittal Ostrava. Zároveň se práce zabývá regulací výměníku tepla z důvodu dodržení požadovaných podmínek při provozních změnách a také z hlediska energetických úspor.

2 Koksárenství

Koksárenství se řadí mezi základní průmyslové odvětví, uplatňující se v hutním průmyslu, který je hlavním spotřebitelem vysokopecního koksu. Ten se využívá jako palivo vysokých pecí. Koks je tedy přidáván do vsázky vysoké pece společně s železnou rudou nebo aglomerátem.

Podstatou výroby koksu je karbonizace předem připravené vsázky černého uhlí v koksárenských bateriích, které jsou nedílnou součástí koksoven.

2.1 Koksovna

Koksovna, jak již bylo zmíněno v předešlém odstavci, tvoří jeden z nejdůležitějších článků v hutním průmyslu. Samotná koksovna tvoří jeden velký závod, který je složen z několika technologických provozů.

Těmito provozy jsou:

- Vykládka uhlí
- Skládka a druhové zásobníky uhlí
- Mlýnice a mlýny uhlí
- Kontrola kvality a jakosti uhlí
- Koksárenské baterie
- Koksochemie

Předem připravená uhelná vsázka v provozech koksovny se následně dopravuje do provozu koksárenských baterií. Koksárenské baterie se vyvinuly do dvou podstatně odlišných druhů provozu. V podstatě se od sebe liší typem obsazování uhelné vsázky do koksárenských komor. Rozlišujeme tedy obsazování uhelnou vsázkou sypaným nebo přechovaným provozem.

Provoz se sypanou vsázkou – V provozu se sypanou uhelnou vsázkou dochází k plnění koksárenské baterie pouze za pomoci zemské gravitace, uhlí je tedy vsazované do koksárenské pece shora třemi až pěti otvory pomocí obsazovacího stroje.



Obr. č. 1 – Velkokapacitní koksárenská baterie se sypaným provozem

Provoz s přechovanou vsázkou - Principem tohoto provozu je upěchování uhlénoho hranolu v obsazovacím (pěchovacím) stroji. Tento upěchovaný hranol se poté opět za pomoci obsazovacího stroje zasune do koksárenské komory přes dveře umístěné v čele koksárenské pece. Díky tomuto způsobu obsazování koksárenských komor se celkově zlepšují vlastnosti koksu a dochází i k výraznému zhuštění uhléno vsázky.



Obr. č. 2 – Koksárenská baterie s přechovaným provozem

2.2 Karbonizace černého uhlí

Po umístění uhelné vsázky do koksárenské komory, a jejím následným hermetickým uzavřením, dochází k intenzivnímu ohřevu uhelné vsázky, v důsledku zahřívání koksárenské komory z vnější strany pomocí hořáků spalujících otopný plyn.

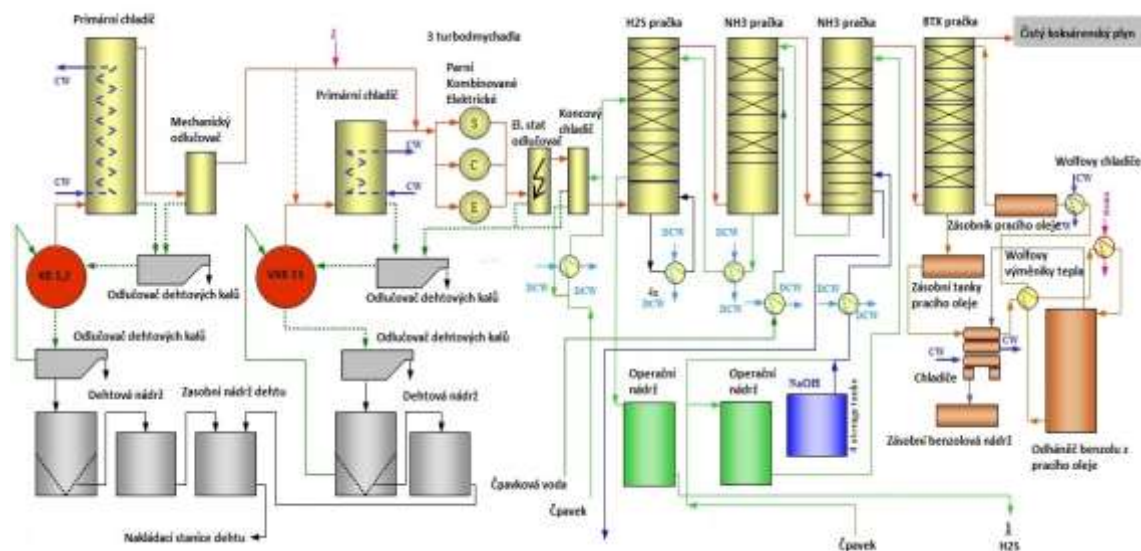
Působením zmíněných vysokých teplot na uhelnou vsázku dochází k takzvanému pyrolýznímu procesu, tedy ke karbonizaci uhlí.

Vlivem karbonizace černého uhlí, tedy jeho tepelným rozkladem za nepřístupu vzduchu vznikají dva základní druhy koksárenských produktů. Prvním, a zároveň primárním produktem je již zmíněný vysokopecní koks, kdy pro získ takového koksu se uplatňuje vysokoteplotní karbonizace uhlí, která probíhá za teploty okolo 1000°C. Sekundárním tedy vedlejším produktem vysokoteplotní karbonizace je surový karbonizační (koksárenský) plyn, který se dále zpracovává v provozu koksochemie. Díky vysokoteplotní karbonizaci dosahují koksovací produkty velmi vysoké kvality.

2.3 Koksochemie

Koksochemie se zabývá získkem a zpracováním sekundárních produktů vzniklých koksovacím procesem. Jedná se tedy především o zachycování plynné složky tedy surového koksárenského plynu, který obsahuje mimo samotného koksárenského plynu také další vzácné složky, které je nutno v rámci efektivity koksovacího procesu získávat a dále využívat. Mezi tyto složky se řadí: dehet, naftalen, benzol, sirovodík, čpavek a mnoho dalších produktů.

Koksochemie je tvořena mnoha technologickými provozy viz (obr 1), které se skládají z různých energetických zařízení. Tyto provozy mají za úlohu oddělit od sebe jednotlivé složky surového koksárenského plynu a získat tak technicky čistý koksárenský plyn a samotné produkty koksochemie.



Obr. č. 3 – Schéma koksochemie

2.4 Koksárenský plyn

Technicky čistý koksárenský plyn, který vzniká vyčištěním v koksochemii, je využíván pro samotnou potřebu koksovy, kde slouží jako otopný plyn pro koksárenské baterie. Z důvodu koksování stále jiných druhů uhlí, dochází k proměnnému prvkovému složení koksárenského plynu, což má vliv na jeho výhřevnost a také na samotné spalování plynu v koksárenských bateriích. Průměrné prvkové složení čistého koksárenského plynu je následující viz (tab. 1).

Látka	Procentuální objem	
	Minimum	Maximum
CO - Oxid uhelnatý	5	7
H ₂ - Vodík	50	59
CO ₂ - Oxid uhličitý	1	3
N ₂ - Dusík	6	13
CH ₄ - Metan	22	26
O ₂ - Kyslík	0	2
CmHm - směs uhlovodíků	2	4

Tab. č. 1 – Průměrné prvkové složení koksárenského plynu

Výhřevnost koksárenského plynu se tedy na základě tohoto složení pohybuje okolo 14-17 MJ/Kg.

Přestože se jedná o technicky čistý koksárenský plyn, stále obsahuje stopové množství látek vzniklých karbonizací černého uhlí, které se nedaly v provozu koksochemie z plynu zcela odstranit. Tyto látky, především naftalen a dehet mají negativní vliv při dopravě plynu potrubím. Důvodem bývá podkročení teploty kondenzace těchto složek, a tím jejich usazování v potrubní síti. Při nedostatečné průchodnosti potrubí dochází ke snížení průtoku plynu, což vede k nerovnoměrnému ohřevu topných stěn koksárenských komor, a tím snížení kvality koksovacích produktů.

3 Výměníky tepla

Jsou energetická zařízení, zajišťující výměnu tepla mezi medií o nestejně teplotě. Výměníky tepla tedy slouží k ohřevu nebo chlazení teplotnosného média.

3.1 Rozdělení výměníku tepla

3.1.1 Dělení podle způsobu předávání tepla mezi medií

Podle tohoto hlediska se výměníky tepla dělí do tří základních typů.

a) Rekuperační výměníky

V tomto typu výměníku dochází ke sdílení tepla prostupem přes teplosměnnou plochu, která odděluje teplotnosné látky.

Podle počtu látek, které se účastní sdílení tepla, výměníky dělíme na dvou a tří látkové.

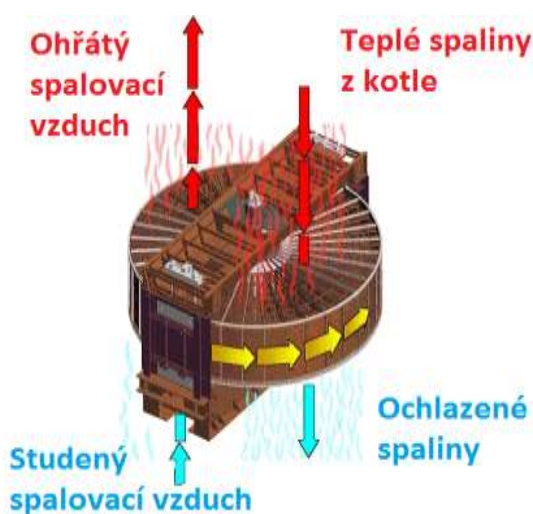
Tyto typy výměníku tepla se následně dále dělí dle typu proudění látek ve výměníku na: souproudé, protiproudé, s křížovým proudem, s vícenásobným souproudem a protiproudem, a vícenásobným křížovým proudem. Jedná se o nejvyžívanější a nejspolehlivější typ výměníku tepla. [3]



Obr. č. 4 – Rekuperační výměník tepla (trubkový)

b) Regenerační výměníky

V regeneračním výměníku tepla se uplatňuje teplosměnná plocha střídavě ohřívána teplejší látkou a ochlazovaná chladnější látkou. Teplosměnná plocha a náplň musí mít jednak dostatečně velký povrch pro sdílení tepla, a velkou měrnou tepelnou kapacitu pro akumulaci tepla. Při tomto typu výměny tepla dochází k promíchávání obou medií, což znamená, že tento typ výměníku se uplatňuje u takových medií, u kterých tohle míšení dvou látek není překážkou. Jedná se tedy především o výměníky (vzduch – vzduch, spaliny – vzduch, spaliny – plyn). Příkladem je regenerační ohřívač vzduchu typu Ljungstrom viz obrázek (Obr. č. 5) [3]



Obr. č. 5 – Regenerační výměník tepla typu Ljungstrom

c) Směšovací výměníky

Obě látky v tomto výměníku se bezprostředně stýkají a přenos tepla je zpravidla spojen s přenosem hmoty. Jsou vhodné pro kapalinu a plyn. Využívá se například při chlazení páry vstříkovanou napájecí vodou. [3]

3.1.2 Dělení výměníků podle druhů látek

Výměna tepla může prakticky probíhat mezi jakýmkoliv druhy medií, záleží však na druhu výměníku a na typu jeho konstrukce. Chladící a chlazená (Ohřívací a hořivná) látka tedy může být: voda, vzduch plyn, spaliny olej. [3]

3.1.3 Dělení podle konstrukčního uspořádání

Výměníky tepla se od sebe mohou navzájem lišit svou konstrukcí.

U rekuperačních výměníků se můžeme setkat s těmito typy konstrukcí:

- Trubkové
- Trubičkové
- Šroubovicové
- Deskové

U regeneračních výměníků tepla se využívají především dva typy. A to regenerační reverzní výměníky tepla, kdy tyto výměníky se využívají většinou v koksárenství, a rotační regenerační výměníky, které se používají při ohřevu spalovacího vzduchu u parních kotlů.

Směšovací výměníky tepla mají většinou jen jeden typ konstrukce a to tlakovou nádobu, kterou proudí chlazené médium (pára), do kterého je tryskou vstřikováno chladící médium (napájecí voda). [3]

4 Zadání praktické části diplomové práce

Zadavatelem mé praktické části diplomové práce je firma Arcelor Mittal Ostrava. Požadavkem je navrhnout vhodný způsob zvýšení teploty topného plynu otopné soustavy koksárenské baterie KB 1 a 2 na teplotu okolo 70°C a udržovat ji v konstantních hodnotách. Zvýšení teploty topného plynu je požadováno z důvodu zabránění kondenzace zbytkových produktů karbonizace černého uhlí a tím i zamezit zanášení potrubní sítě otopného plynu vedoucímu k hořákům koksárenských komor těmito usazeninami.

Vhodným řešením této problematiky, je aplikace výměníku tepla do potrubního systému, který by prostřednictvím ohřívacího média předával koksárenskému plynu teplo, a tím zvyšoval jeho teplotu na požadovanou hodnotu, čímž by zabránil této kondenzaci.

Pro tento případ sdílení tepla je nejvhodnější volbou rekuperační výměník, o trubkovém konstrukčním uspořádání, kdy koksárenský plyn (ohříváné médium), by prudil v trubkách, a byl by z vnějšku zahříván ohřívacím médiem. Tohle konstrukční

řešení jsem zvolil z bezpečnostních důvodů, a to z hlediska těsnosti systému na straně koksárenského plynu.

Společně se zadáním řešené problematiky, byly dodány také parametry ohřívaného média, a parametry dvou ohřívacích médií, které by bylo možno použít pro ohřev koksárenského plynu. V případě možných ohřívacích médií se jedná o přehřátou páru a tlakovou horkou vodu.

4.1 Vstupní parametry ohřívaného média (koksárenského plynu)

- **Chemické složení plynu**

CO = 5,8%, H₂ = 56,1%, CO₂ = 2,4%, N₂ = 7,6%, CH₄ = 24,7%, C_nH_m = 2,4%, O₂ = 1%

- **Objemový průtok plynu**

Technické minimum: 5550 m³/h, Minimum: 6500 m³/h, Maximum: 7000 m³/h

- **Teplota plynu v potrubní síti**

Minimální: -11°C, Maximální: 24°C

- **Tlak plynu**

Zadaný přetlak: 3,35 kPa

- **Požadovaná teplota plynu**

Zadaná: 70°C

4.2 Vstupní parametry ohřívacích médií (Tlaková voda a sytá pára)

4.2.1 Pára (ohřívací médium)

- **Tlak páry**

Zadaný přetlak: 0,45 MPa

- **Teplota páry**

Zadaná: 180°C

4.2.2 Tlaková horká voda (ohřívací médium)

- Tlak vody

Zadaný přetlak: 0,45 MPa

- Teplota vody

Zadaná: 140°C

5 Volba vstupních a výstupních parametrů ohřívacího a ohřívaného média

5.1 Volba parametrů ohřívaného média (koksárenského plynu)

Z hlediska dosažení požadovaných parametrů koksárenského plynu s co nejvyšší spolehlivostí, volím následující parametry koksárenského plynu pro výpočet přehříváče.

- Teplota vstupní $t_{KP,IN} = -11^{\circ}\text{C}$
- Teplota výstupní $t_{KP,OUT} = 70^{\circ}\text{C}$
- Vstupní absolutní tlak $p_{KP,ABS} = 0,10467 \text{ MPa}$
- Objemové množství $\dot{V} = 1,944 \text{ m}^3/\text{s}$

5.1.1 Fyzikální vlastnosti koksárenského plynu

Pro výpočet fyzikálních vlastností koksárenského plynu je nutné vyhledat fyzikální vlastnosti jednotlivých složek tvořící koksárenský plyn. Pro toto dohledání jsem použil výpočtový software EES.

	Množství	Hustota	Měrná tep. kapacita	Dyn. Viskozita	Tep. vodivost	Prandtlovo číslo
	[-]	$\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$c \text{ [kJ/kg}\cdot\text{K]}$	$\eta \cdot 10^6 \text{ [N}\cdot\text{s/m}^2\text{]}$	$\lambda \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$	$Pr \text{ [-]}$
CO	0,058	1,165	1,04	17,77	0,02668	0,6927
H2	0,561	0,0838	14,32	9,107	0,1792	0,7276
CO2	0,024	1,84	0,8554	15,15	0,01699	0,7627
N2	0,076	1,165	1,041	18,01	0,02616	0,7171
CH4	0,247	0,6685	2,242	11,34	0,03474	0,7318
CnHm	0,024	1,39	1,2	14,65	0,021	0,7221
O2	0,01	1,289	0,9197	20,8	0,0267	0,7166

Tab. č. 2 – Hodnoty fyzikálních vlastností jednotlivých složek koksárenského plynu

Následný výpočet fyzikálních vlastností koksárenského plynu, je proveden váženým průměrem dle obsahu jednotlivých složek v plynu a jejich jednotlivých fyzikálních vlastností.

Hustota koksárenského plynu

$$\begin{aligned}\rho_{KP} &= (\rho_{CO} * \omega_{CO}) + (\rho_{CO2} * \omega_{CO2}) + (\rho_{H2} * \omega_{H2}) + (\rho_{N2} * \omega_{N2}) + (\rho_{CH4} * \omega_{CH4}) \\ &+ (\rho_{CnHm} * \omega_{CnHm}) + (\rho_{O2} * \omega_{O2}) \\ \rho_{KP} &= 0,459 [kg/m^3]\end{aligned}\quad (1)$$

Měrná tepelná kapacita koksárenského plynu

$$\begin{aligned}cp_{KP} &= (cp_{CO} * \omega_{CO}) + (cp_{CO2} * \omega_{CO2}) + (cp_{H2} * \omega_{H2}) + (cp_{N2} * \omega_{N2}) \\ &+ (cp_{CH4} * \omega_{CH4}) + (cp_{CnHm} * \omega_{CnHm}) + (cp_{O2} * \omega_{O2}) \\ cp_{KP} &= 8,785 [kJ/(kg * K)]\end{aligned}\quad (2)$$

Dynamická viskozita koksárenského plynu

$$\begin{aligned}\eta_{KP} &= (\eta_{CO} * \omega_{CO}) + (\eta_{CO2} * \omega_{CO2}) + (\eta_{H2} * \omega_{H2}) + (\eta_{N2} * \omega_{N2}) + (\eta_{CH4} * \omega_{CH4}) \\ &+ (\eta_{CnHm} * \omega_{CnHm}) + (\eta_{O2} * \omega_{O2}) \\ \eta_{KP} &= 11,233 * 10^{-6} [(N * s)/m^2]\end{aligned}\quad (3)$$

Kinematická viskozita koksárenského plynu

$$\begin{aligned}v_{KP} &= \eta_{KP} / \rho_{KP} \\ v_{KP} &= 24,491 * 10^{-6} [m^2/s]\end{aligned}\quad (4)$$

Prandtlovo číslo

$$\begin{aligned}Pr_{KP} &= (Pr_{CO} * \omega_{CO}) + (Pr_{CO2} * \omega_{CO2}) + (Pr_{H2} * \omega_{H2}) + (Pr_{N2} * \omega_{N2}) \\ &+ (Pr_{CH4} * \omega_{CH4}) + (Pr_{CnHm} * \omega_{CnHm}) + (Pr_{O2} * \omega_{O2}) \\ Pr_{KP} &= 0,726 [-]\end{aligned}\quad (5)$$

Tepelná vodivost koksárenského plynu

$$\lambda_{KP} = (\lambda_{CO} * \omega_{CO}) + (\lambda_{CO2} * \omega_{CO2}) + (\lambda_{H2} * \omega_{H2}) + (\lambda_{N2} * \omega_{N2}) + (\lambda_{CH4} * \omega_{CH4}) \\ + (\lambda_{CnHm} * \omega_{CnHm}) + (\lambda_{O2} * \omega_{O2})$$

$$\lambda_{KP} = 0,114 [W/m * K] \quad (6)$$

	Hustota	Měrná tep. kapacita	Dyn. Viskozita	Kin. Viskozita	Tep. Vodivost	Prandtlovo číslo
	ρ [kg/m ³]	c [kJ/kg*K]	η *10 ⁶ [N*s/m ²]	ν *10 ⁶ [m ² /s]	λ [W/m*K]	Pr [-]
Koksárenský plyn	0,459	8,785	11,233	24,491	0,114	0,726

Tab. č. 3 – Tabulka vypočítaných fyzikální vlastnosti koksárenského plynu

5.1.2 Výpočet entalpie koksárenského plynu

Entalpie koksárenského plynu na vstupu do předehříváče

$$i_{KP,in} = cp_{KP} * T_{KP,in}$$

$$i_{KP,in} = 8,785 * (-11 + 273,15)$$

$$i_{KP,in} = 2303 \text{ kJ/kg} \quad (7)$$

Entalpie koksárenského plynu na výstupu z předehříváče

$$i_{KP,out} = cp_{KP} * T_{KP,out}$$

$$i_{KP,out} = 8,785 * (70 + 273,15)$$

$$i_{KP,out} = 3014,5 \text{ kJ/kg} \quad (8)$$

5.2 Volba vhodného ohřívacího média a jeho parametrů

5.2.1 Fyzikální vlastnosti páry a kondenzátu a výpočet tepelné bilance parního přehříváče

V případě volby páry jako přehřívacího média, by se jednalo o kondenzační výměník tepla. Tudíž páru, vstupující do přehříváče o výše uvedených parametrech, by bylo nutno ochladit ve výměníku na kondenzační teplotu, která má hodnotu 155°C při absolutním tlaku 0,55 MPa. Po dosažení této teploty by se využíval potenciál kondenzačního tepla páry pro ohřátí koksárenského plynu.

Jelikož se v případě kondenzace jedná o izotermický děj, kondenzát na výstupu z přehříváče by měl teplotu stejnou jako je kondenzační teplota páry tedy 155°C. Tento uvažovaný stav však platí pouze tehdy, že kondenzát bude ihned odváděn z přehříváče.

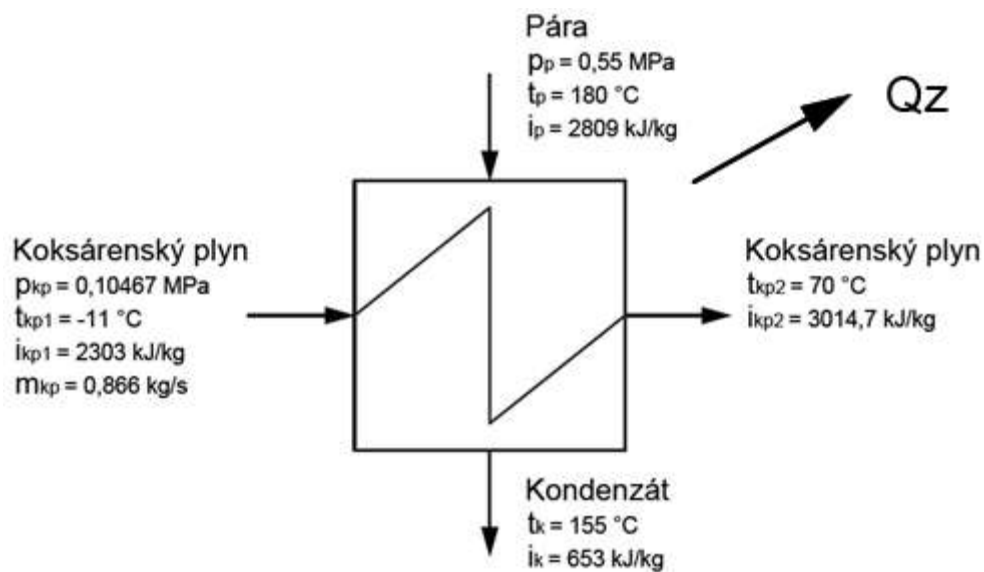
Pára/Kondenzát

- Teplota vstupní: $t_{P,IN} = 180^{\circ}\text{C}$
- Teplota výstupní: $t_{K,OUT} = 155^{\circ}\text{C}$
- Vstupní absolutní tlak: $p_{p,OUT} = 0,55 \text{ MPa}$

Pro dohledání fyzikálních vlastností přehřáté páry, páry na mezi sytosti a kondenzátu jsem použil výpočtový software EES.

		Pára na vstupu	Pára po ochlazení	Kondenzát
Teplota	°C	180	155	155
Hustota	ρ [kg/m ³]	2,729	2,282	938,3
Měrná tepelná kapacita	c_p [kJ/kg*K]	2,219	2,271	4,325
Dyn. Viskozita	η *10 ⁶ [N*s/m ²]	15,2	14,68	220
Kin. Viskozita	ν *10 ⁶ [m ² /s]	5,570	6,433	0,2345
Tepelná vodivost	λ [W/m*K]	0,3372	0,0329	0,6698
Prandtlovo číslo	Pr [-]	1	1,01	1,142
Entalpie páry	i [kJ/kg]	2809	2781	653,8
Latentní teplo	i' [kJ/kg]	-	-	2,098

Tab. č. 4 – Tabulkové hodnoty fyzikálních vlastností páry a kondenzátu



Obr. č. 6 – Bilance parního předehříváče

Bilanční rovnice předehříváče

$$Q_{KP_IN} + Q_{P_IN} = Q_{KP_OUT} + Q_{KOND_OUT} + Q_Z \quad (9)$$

$$(i_{KP1} \cdot m_{KP}) + (i_P \cdot m_P) = (i_{KP2} \cdot m_{KP}) + (i_{KOND} \cdot m_{KOND}) + Q_Z$$

Při výpočtu předehříváče zanedbávám tepelné ztráty do okolí (Q_Z), tudíž výsledná rovnice tepelné bilance je následující:

$$(i_{KP1} \cdot m_{KP}) + (i_P \cdot m_P) = (i_{KP2} \cdot m_{KP}) + (i_{KOND} \cdot m_{KOND})$$

Výpočet tepelného výkonu výměníku

$$Q_{celk} = m_{KP} \cdot (i_{KP2} - i_{KP1})$$

$$Q_{celk} = 0,892 \cdot (3014,7 - 2303,1)$$

$$Q_{celk} = 634,6 \text{ kW} \quad (10)$$

Výpočet hmotnostního průtoku páry

$$m_p = \frac{Q_{celk}}{(i_p - i_k)}$$

$$m_p = \frac{634,6}{(2809 - 653,8)}$$

$$m_p = 0,294 \text{ kg/s} \quad (11)$$

Z tepelné bilance předehříváku koksárenského plynu pomocí páry a následného výpočtu hmotnostního průtoku lze vyčíst, že pro ohřev koksárenského plynu na teplotu 70°C, při hmotnostním průtoku plynu 0,866 kg/s, je nutno dodávat páru o uvedených parametrech hmotnostním průtokem $m_p = 0,294 \text{ kg/s}$.

5.2.2 Fyzikální vlastnosti horké tlakové vody a výpočet tepelné bilance horkovodního předehříváče

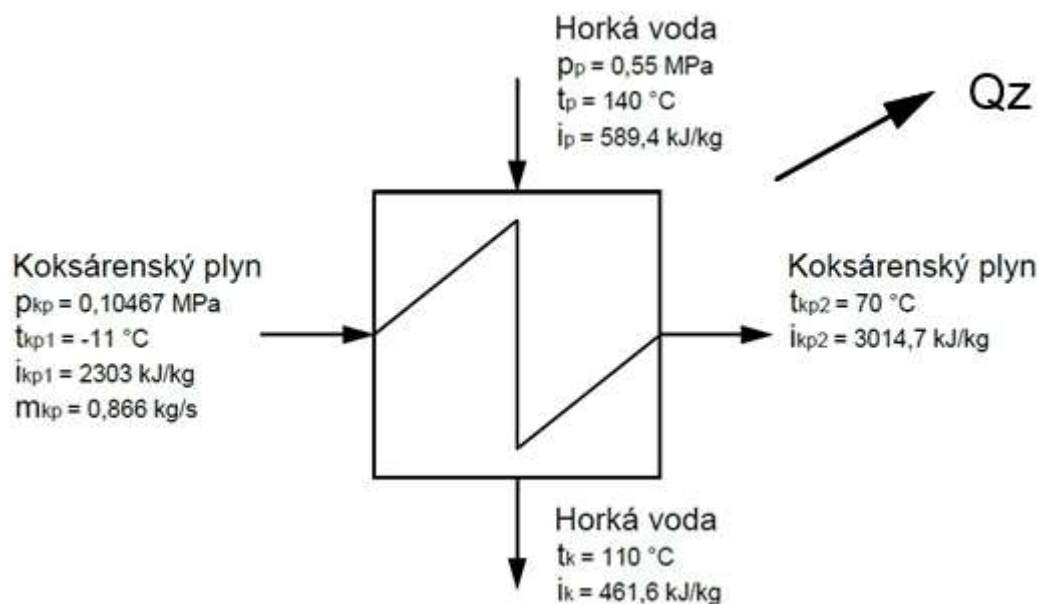
Tlaková horká voda

- Teplota vstupní: $t_{HV,IN} = 140^\circ\text{C}$
- Teplota výstupní: $t_{HV,OUT} = 110^\circ\text{C}$
- Vstupní absolutní tlak: $p_{HV,OUT} = 0,55 \text{ MPa}$

Pro dohledání fyzikálních vlastností horké tlakové vody jsem použil výpočtový software EES.

		Voda na vstupu	Voda na výstupu
Teplota	°C	140	110
Hustota	ρ [kg/m ³]	926,3	951,2
Měrná tepelná kapacita	c_p [kJ/kg*K]	4,288	4,231
Dyn. Viskozita	$\eta \cdot 10^6$ [N*s/m ²]	196,7	254,9
Kin. Viskozita	$\nu \cdot 10^6$ [m ² /s]	0,212	0,2679
Tepelná vodivost	λ [W/m*K]	0,6695	0,6678
Prandtlovo číslo	Pr [-]	1,259	1
Entalpie páry	i [kJ/kg]	589,4	461,6
Latentní teplo	i' [kJ/kg]	-	-

Tab. č. 5 – Tabulkové hodnoty fyzikálních vlastností horké tlakové vody



Obr. č. 7 – Bilance horkovodního předehříváče

Bilanční rovnice předehříváče

$$Q_{KP_IN} + Q_{HV_IN} = Q_{KP_OUT} + Q_{HV_OUT} + Q_Z \quad (12)$$

$$(i_{KP1} \cdot m_{KP}) + (i_{HV} \cdot m_{HV}) = (i_{KP2} \cdot m_{KP}) + (i_{HV} \cdot m_{HV}) + Q_Z$$

Při výpočtu předehříváče zanedbávám tepelné ztráty do okolí (Q_Z), tudíž výsledná rovnice tepelné bilance je následující:

$$(i_{KP1} \cdot m_{KP}) + (i_{HV} \cdot m_{HV}) = (i_{KP2} \cdot m_{KP}) + (i_{HV} \cdot m_{HV}) \quad (13)$$

Výkon tepelného výměníku

Tepelný výkon horkovodního předehříváče bude stejný, jako u předehříváče parního.

$$Q_{celk} = 634,6 \text{ kW}$$

Výpočet hmotnostního průtoku horké tlakové vody

$$m_{HV} = \frac{Q_{celk}}{(i_{HV,140} - i_{HV,110})}$$
$$m_{HV} = \frac{634,6}{(589,4 - 461,6)}$$
$$m_{HV} = 4,96 \text{ kg/s} \quad (14)$$

Z tepelné bilance přehříváku koksárenského plynu pomocí horké vody a následného výpočtu hmotnostního průtoku lze vyčíst, že pro ohřev koksárenského plynu na teplotu 70°C, při hmotnostním průtoku plynu 0,866 kg/s, je nutno dodávat horkou vodu o uvedených parametrech hmotnostním průtokem $m_{HV} = 4,96 \text{ kg/s}$.

Při porovnání tepelných bilancí a hmotnostních průtoků páry a horké vody je patrné že pro ohřev koksárenského plynu horkou vodou je potřeba 17x větší průtokové množství horké vody než přehřáté páry.

Z tohoto hlediska a také z důvodu lepších fyzikálních vlastností páry oproti horké tlakové vodě, volím jako přehřívací médium přehřátou páru o výše uvedených parametrech.

Z této volby vyplývá, že v následných výpočtech přehříváče bude jako ohřívací médium uvažována pouze přehřátá pára.

6 Tepelný výpočet parního přehříváče koksárenského plynu

Výpočet tepelného výkonu parní části přehříváče (ochlazení páry na teplotu kondenzace)

$$Q_1 = m_p * (i_{p1} - i_{p2})$$
$$Q_1 = 0,294 * (2809 - 2781)$$
$$Q_1 = 8,245 \text{ kW} \quad (15)$$

Výpočet tepelného výkonu kondenzační části předehříváče

$$Q_2 = m_p \cdot (i_{p2} - i_k)$$

$$Q_2 = 0,294 \cdot (2781 - 653,8)$$

$$Q_2 = \mathbf{626,38 \text{ kW}} \quad (16)$$

$$Q_{celk} = Q_1 + Q_2$$

$$Q_{celk} = 8,245 + 626,38$$

$$Q_{celk} = \mathbf{634,6 \text{ kW}}$$

Entalpie koksárenského plynu na začátku parní části výměníku

$$i'_{KP2} = \frac{Q_2}{m_{KP}} + i_{KP1}$$

$$i'_{KP2} = \frac{626,38}{0,892} + 2303,1$$

$$i'_{KP2} = \mathbf{3005,4 \text{ kJ/kg}} \quad (17)$$

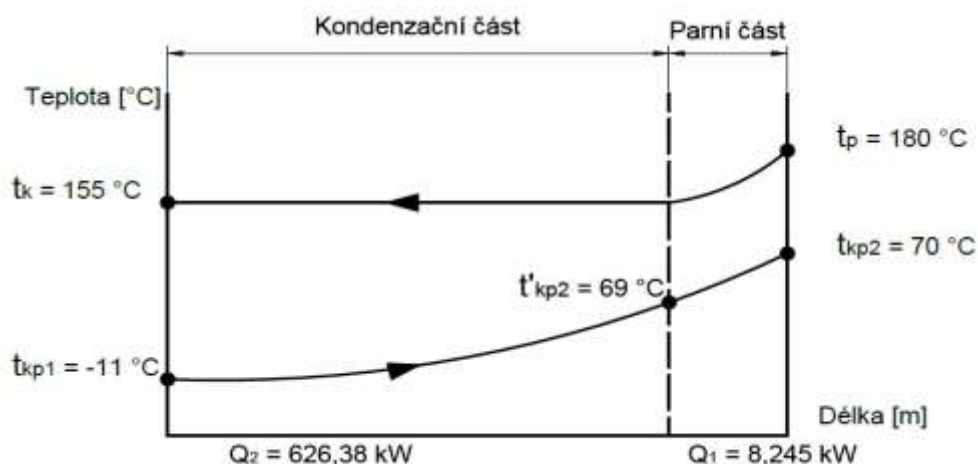
Teplota koksárenského plynu na začátku parní části výměníku

$$t'_{KP2} = \frac{i'_{KP2}}{cp_{KP}} - t_0$$

$$t'_{KP2} = \frac{3005,4}{8,785} - 273,15$$

$$t'_{KP2} = \mathbf{68,95^\circ C} \quad (18)$$

Z hlediska větších přestupů tepla, a tím i zaručení mešní teplosměnné plochy, volím protiproudé koncepční uspořádání rekuperačního výměníku tepla.



Obr. č. 8 – Průběh teploty médií v závislosti na délce teplosměnné plochy

6.1 Tepelný výpočet předehřívače na straně předehřívaného média (koksárenského plynu)

Rychlost proudění plynu v trubkách

Pro výpočet rychlosti proudění plynu, je nutno nejdříve určit charakteristické rozměry trubek, ve kterých bude koksárenský plyn proudit. Těmito rozměry jsou vnější a vnitřní průměr. Společně s těmito rozměry trubek volím také materiál, ze kterého jsou trubky vyrobeny.

Materiál trubek volím ocel 11 416. Tato ocel se řadí do třídy konstrukčních nelegovaných ocelí s obsahem uhlíku do 0,25%. Tento materiál je plně dostačující pro aplikaci do řešeného předehřívače koksárenského plynu.

Vnější průměr trubek	D [m]	0,0269
Vnitřní průměr trubek	d [m]	0,0229
Tepelná vodivost trubky	W/m*K	53,5

Tab. č. 6 – Tabulka charakterizující trubky parního předehřívače

Rychlost proudění plynu v trubkách

Při výpočtu rychlosti proudění koksárenského plynu v trubkách vycházím z podmínky turbulentního proudění. Důvodem volby turbulentního proudění je předpoklad, že při tomto druhu proudění nastanou co nejlepší podmínky pro sdílení tepla. Turbulentní proudění nastává při Reynoldsově číslu: $Re = 10\,000$

Výpočet rychlosti tedy vychází ze vzorce pro výpočet Reynoldsova čísla, kdy:

$$Re = \frac{w_{KP} * d}{\nu_{KP}} \gg w_{KP} = \frac{Re * \nu_{KP}}{d}$$

$$w_{KP} = \frac{10000 * 24,491 * 10^{-6}}{0,0229}$$

$$w_{KP} = 10,695 \text{ m/s} \quad (19)$$

Výpočet a volba počtu trubek v parním předehříváči

$$S = \frac{\pi * d^2}{4}$$

$$S = \frac{\pi * 0,0229^2}{4}$$

$$S = 4,12 * 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (20)$$

$$\dot{V} = 7000 \text{ m}^3/\text{h} = 1,944 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$n_{tr} = \frac{\dot{V}}{S * w_{KP}}$$

$$n_{tr} = \frac{1,944}{4,12 * 10^{-4} * 10,695}$$

$$n_{tr} = 441,45 \approx 376 \text{ ks} \quad (21)$$

K vypočítané rychlosti proudění koksárenského plynu trubkami, vyšel počet trubek okolo 442 ks v předehříváči.

Z hlediska možného proměnlivého objemového průtoku koksárenského plynu, které lze vyčíst ze zadání, volím počet trubek nižší a to konkrétně 376 ks, aby byla dodržena podmínka turbulentního proudění. Snížení počtu trubek v předehřívače má dále příznivý důsledek na ohřev plynu při jiné teplotě koksárenského plynu na vstupu do předehřívače než je teplota výpočtová (-11°C).

Přepočet Reynoldsova čísla a rychlosti vzhledem k počtu trubek

Z důvodu snížení počtu trubek v předehřívači je nutno provést přepočet výpočtové rychlosti proudění koksárenského plynu a Reynoldsova čísla.

$$w_{KP} = \frac{\dot{V}}{S * n_{tr}}$$

$$w_{KP} = \frac{1,944}{4,12 * 10^{-4} * 376}$$

$$w_{KP} = \mathbf{12,55 \text{ m/s}} \quad (22)$$

$$Re = \frac{w_{KP} * d}{\nu_{KP}}$$

$$Re = \frac{12,55 * 0,0229}{24,491 * 10^{-6}}$$

$$Re = \mathbf{11740 [-]} \quad (23)$$

Výpočet Nusseltova čísla při proudění koksárenského plynu v předehřívači

Následující výpočet Nusseltova čísla charakterizuje turbulentní proudění média v trubkách. Rovnice (24) zahrnuje Reynoldsovo a Prandtlovo číslo proudícího média a také opravné součinitele.

$$Nu = 0,021 * Re^{0,8} * Pr_{KP}^{0,43} * \varepsilon_t * \varepsilon_R * \varepsilon_L \quad [-] \quad (24)$$

Opravný součinitel ε_R se vztahuje na tvarové změny potrubí, jako jsou například oblouky. Jelikož jsou trubky v předehřívači rovné, tedy bez změny tvaru, je možno tento opravný součinitel zanedbat.

Opravný součinitel ε_L se zahrnuje do vzorce (24) pouze tehdy, je-li uvažovaná délka trubek ve výměníku menší, než je padesátinásobek vnitřního průměru trubek. Z hlediska velkého počtu trubek o zvoleném průměru a nízkému výkonu parní části přehříváče uvažují, že délka trubek této části bude velmi malá.

Předběžnou délku trubek volím $l_{tr} = 0,1 \text{ m}$.

$$50 \cdot d = 50 \cdot 0,0229 = 1,145 \text{ m} \quad (25)$$

Z důvodu vyššího $50 \cdot d$ než je zvolená předběžná délka trubek, je nutno tento opravný součinitel zahrnout do výpočtu.

$$\frac{l_{tr}}{d} = \frac{0,1}{0,0229} = 4,366 \approx 5$$

$$Re < 2 \cdot 10^4$$

l/d	1	2	5	10	15	20	30	40	50
$Re = 2 \cdot 10^4$	1,51	1,4	1,27	1,18	1,13	1,1	1,05	1,2	1
$Re = 5 \cdot 10^4$	1,32	1,27	1,18	1,1	1,08	1,04	1,02	1,1	1
$Re = 1 \cdot 10^5$	1,28	1,22	1,15	1,1	1,08	1,06	1,03	1,02	1
$Re = 1 \cdot 10^6$	1,14	1,11	1,08	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1

Tab. č. 7 – Tabulka sloužící k volbě opravného součinitele pro krátké trubky ε_L

Opravný součinitel pro krátké trubky volím dle odečtu z tabulky: $\varepsilon_L = 1,27$

Opravný součinitel ε_t se zahrnuje do výpočtu při neizotermickém proudění, tedy při proudění média, kterému se v trubce mění teplota, což je případem mého výpočtu.

Opravný součinitel pro neizotermické proudění ε_t se volí dle následujících podmínek:

$T_s, T \dots$ Absolutní teploty stěny a tekutiny [K]

$$T = \frac{(t'_{KP2} + 273,15) + (t_{KP,IN} + 273,15)}{2}$$

$$T = \frac{(68,94 + 273,15) + (-11 + 273,15)}{2}$$

$$T = 302,12 \text{ K} \quad (26)$$

$$T_s = \frac{T + (155 + 273,15)}{2}$$

$$T_s = \frac{302,12 + (155 + 273,15)}{2}$$

$$T_s = \mathbf{365,13[K]} \quad (27)$$

Po výpočtu absolutní teploty stěny a tekutiny, následným podílem těchto dvou hodnot, získám konstantu, na základě které budu volit rovnici pro výpočet opravného součinitele pro neizotermické proudění.

$$\frac{T_s}{T} = \frac{365,13}{302,12} = \mathbf{1,208} \quad [1]$$

$\frac{T_s}{T} = 0,5 \text{ až } 1 \quad \varepsilon_t = 1,27 - 0,27 * \frac{T_s}{T}$
$\frac{T_s}{T} = 1 \text{ až } 3,5 \quad \varepsilon_t = \left(\frac{T_s}{T}\right)^{-0,55}$

$$\varepsilon_t = \left(\frac{T_s}{T}\right)^{-0,55}$$

$$\varepsilon_t = \left(\frac{365,13}{302,12}\right)^{-0,55}$$

$$\varepsilon_t = \mathbf{0,901} \quad [1] \quad (28)$$

Dosazení vypočítaných, a dohledaných hodnot do rovnice (24) pro výpočet Nusseltova čísla.

$$Nu = 0,021 * 11740,76^{0,8} * 0,726^{0,43} * 0,901 * 1,27$$

$$Nu = \mathbf{37,73} \quad [1] \quad (29)$$

Výpočet součinitele přestupu tepla α na straně koksárenského plynu

Pro výpočet součinitele přestupu tepla se vychází z Nusseltova kritéria, kdy tvar Nusseltova kritéria je následující:

$$Nu = \frac{L * \alpha}{\lambda} \quad [1]$$

L - Charakteristický rozměr

λ - Tepelná vodivost

α - Součinitel přestupu tepla

$$\begin{aligned} Nu &= \frac{L * \alpha}{\lambda} \quad \gg \quad \alpha_{KP} = \frac{\lambda_{KP} * Nu}{d_1} \\ \alpha_{KP} &= \frac{0,114 * 37,73}{0,0229} \\ \alpha_{KP} &= \mathbf{187,82 \frac{W}{m^2 * K}} \end{aligned} \quad (30)$$

6.2 Tepelný výpočet přehříváče na straně přehřívacího média (kondenzační část)

6.2.1 Výpočet kondenzační části výměníku

Jedná se o podstatnou část přehříváče, jelikož v této části bude docházet k největšímu přestupu tepla, využitím kondenzačního tepla páry.

Pro výpočet kondenzace páry na stěnách trubky je nutno stanovit určující teplotu, kterou je teplota blány kondenzátu právě na stěně trubky, při které pak stanovím fyzikální vlastnosti kondenzátu.

- t_K ...teplota kondenzátu, t_s ...střední teplota stěny trubky

$$t_s = \frac{t_K + \frac{t_{KP,IN} + t_{KP,OUT}}{2}}{2}$$

$$t_s = \frac{155 + \frac{-11 + 70}{2}}{2}$$

$$t_s = 92,25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (31)$$

$$t_{blány} = \frac{t_K + t_s}{2}$$

$$t_{blány} = \frac{155 + 92,25}{2}$$

$$t_{blány} = 123,6 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (32)$$

Pro dohledání fyzikálních vlastností kondenzátu o střední teplotě blány, jsem použil výpočtový software EES.

Veličina	Jednotka	Kondenzát
Hustota	ρ [kg/m ³]	938,3
Dyn. Viskozita	$\eta \cdot 10^{-6}$ [(N*s)/m ²]	220
Tepelná vodivost	λ [W/m*K]	0,6698
Latentní teplo	i' [kJ/kg]	2,098

Tab. č. 8 – Tabulka fyzikálních vlastností kondenzátu za určující teploty

Výpočet součinitele přestupu tepla α na straně kondenzace

Jedná se o přímý výpočet součinitele přestupu tepla při kondenzaci páry na ploše trubky. Tento součinitel popisuje následující rovnice (33):

$$\alpha_{KOND} = c * \left(\frac{\lambda^3 * g * \rho * i'}{\frac{\eta}{\rho} * (t_K - t_s) * l} \right)^{0,25} \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$$

Kdy c je konstanta, která upravuje vztah dle typu plochy kondenzace. Pro můj případ je konstanta $c = 1,13$, což je hodnota upravující vztah pro kondenzaci na svislé ploše. Hodnota l v čitateli vzorce vyjadřuje uvažovanou délku trubek, na kterých bude probíhat kondenzace, pro můj případ tuto délku volím $l = 1,3 \text{ m}$.

$$\alpha_{KOND} = 1,13 * \left(\frac{0,6698^3 * 9,81 * 938,3^2 * 2,098 * 10^6}{220 * 10^{-6} * (155 - 92,25) * 1,3} \right)^{0,25}$$

$$\alpha_{KOND} = 4716,1 \frac{W}{m^2 * K} \quad (33)$$

Součinitel prostupu tepla

Součinitel prostupu tepla vyjadřuje, kolik tepla pronikne přes stěnu trubky, o délce 1 metru mezi dvěma médii o rozdílné teplotě. Tento součinitel je dán následujícím vztahem:

$$k = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_{KP} * d_1} + \frac{1}{2 * \lambda_{tr}} * \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_{KOND} * d_2}}$$

$$k = \frac{\pi}{\frac{1}{187,82 * 0,0229} + \frac{1}{2 * 53,5} * \ln \frac{0,0269}{0,0229} + \frac{1}{4716,1 * 0,0269}}$$

$$k = 12,987 \frac{W}{m * K} \quad (34)$$

Střední logaritmický teplotní spád

Součinitel ψ , upravuje vztah dle tvaru teplosměnné plochy. Pro rovinné trubky, což je případ mého přehříváče, je součinitel $\psi = 1$.

$$\Delta t_{stř} = \frac{(t_{kond} - t_{KP1}) - (t_{kond} - t'_{KP1})}{\ln \frac{t_{kond} - t_{KP1}}{t_{kond} - t'_{KP1}}} * \psi$$

$$\Delta t_{stř} = \frac{(155 - (-11)) - (155 - 68,95)}{\ln \frac{155 - (-11)}{155 - 68,95}} * 1$$

$$\Delta t_{stř} = 121,67^\circ C \quad (35)$$

Délka trubek ve výměníku

Délka trubek parního předehříváče vychází z rovnice pro výpočet tepelného výkonu jedné trubky předehříváče, který má následující tvar:

$$Q = k \cdot \Delta t_{stř} \cdot l \cdot n_{trubek} \quad \gg \quad l = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_{stř} \cdot n_{trubek}}$$

$$l_{trub,kond} = \frac{Q_2}{k \cdot \Delta t_{stř} \cdot n_{trubek}}$$

$$l_{trub,kond} = \frac{626,38 \cdot 10^3}{12,987 \cdot 121,67 \cdot 376}$$

$$l_{trub,kond} = 1,054 \text{ m} \quad (36)$$

Teplosměnná plocha

$$S_2 = \pi \cdot D \cdot l \cdot n_{trubek}$$

$$S_2 = \pi \cdot 0,0269 \cdot 1,054 \cdot 376$$

$$S_2 = 33,49 \text{ m}^2 \quad (37)$$

Vypočítaná teplosměnná plocha sloužící k přenosu kondenzačního tepla má plochu $33,49 \text{ m}^2$, a je tvořena svislými trubkami o zvolených parametrech, a vypočítané délce 1,054 m.

6.2.2 Výpočet parní části předehříváče (ochlazování předehřáté páry na kondenzační teplotu)

Určující teplotou je střední teplota tekutiny

$$t = \frac{t_p + t'_p}{2}$$

$$t = \frac{180 + 155}{2}$$

$$t = 167,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (38)$$

Fyzikální vlastnosti páry

Pro dohledání fyzikálních vlastností páry o teplotě 167,5°C a absolutním tlaku 0,55 MPa, jsem použil výpočtový software EES.

		Pára
Hustota	ρ [kg/m ³]	2,822
Dynamická viskozita	$\eta \cdot 10^6$ [N*s/m ²]	14,68
Tepelná vodivost	λ [W/m*K]	0,03298
Kinematická viskozita	$\nu \cdot 10^6$ [m ² /s]	5,2
Měrná tepelná kapacita	c_p [kJ/kg*K]	2,271
Prandtlovo číslo	Pr [-]	1,011

Tab. č. 9 – Tabulka fyzikálních vlastností páry za určující teploty

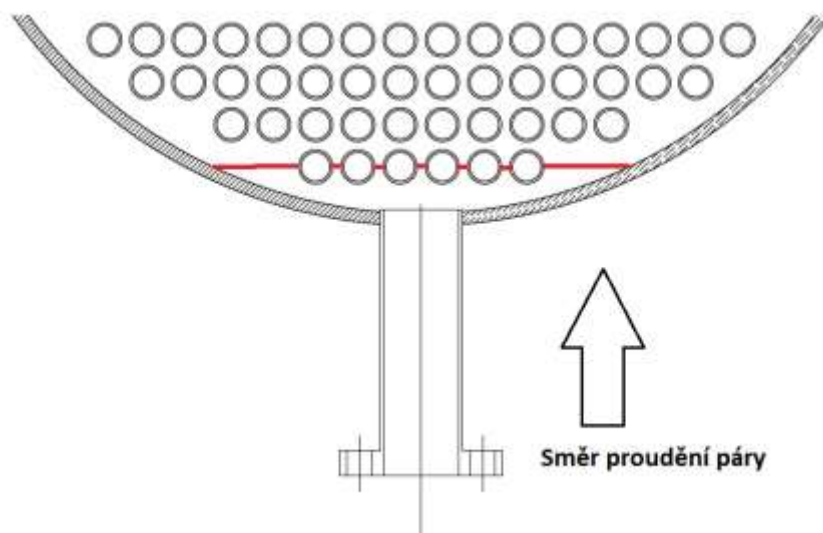
Výpočet rychlosti páry v parní části výměníku

- Množství páry: $\dot{V}_p = 0,108 \text{ m}^3/\text{s}$

Při výpočtu rychlosti proudění páry v ochlazovací části výměníku je nutno nejdříve vypočítat průtočnou plochu, kterou bude pára protékat, a dále vypočítat rychlost proudění páry, která touto plochou bude protékat. Řešením je vypočítat nejmenší a největší průtočnou plochu v přehříváči, kterou bude pára proudit, a v těchto plochách vypočítat její rychlost. Ziskem těchto dvou rychlostí a jejich následným aritmetickým průměrem získám přibližnou rychlost proudění páry v ochlazovací části přehříváče, kterou je možno použít pro výpočet přestupu tepla.

Výpočet rychlosti páry průchodem první řady trubek

Tato plocha je uvažována jako nejmenší průtočná plocha páry, která je tvořena plochami mezi jednotlivými trubkami a plochami mezi krajními trubkami a pláštěm přehříváče. Tyto plochy mají výšku 0,179 m, což je uvažovaná mezera mezi přepážkou oddělující ochlazovací a kondenzační část přehříváče a víkem trubkovnice (obr. č. 9).



Obr. č. 9 – Obrázek vyznačené nejmenší průtočné plochy páry

- Zvolená výška trubek: $l_{tr} = 0,179 \text{ m}$
- Délka vyznačené ofukované plochy: $l_{plochy} = 0,16997 \text{ m}$

$$S_1 = l_{plochy} \cdot l_{tr}$$

$$S_1 = 0,16997 \cdot 0,179$$

$$\mathbf{S_1 = 0,0304 \text{ m}^2} \quad (39)$$

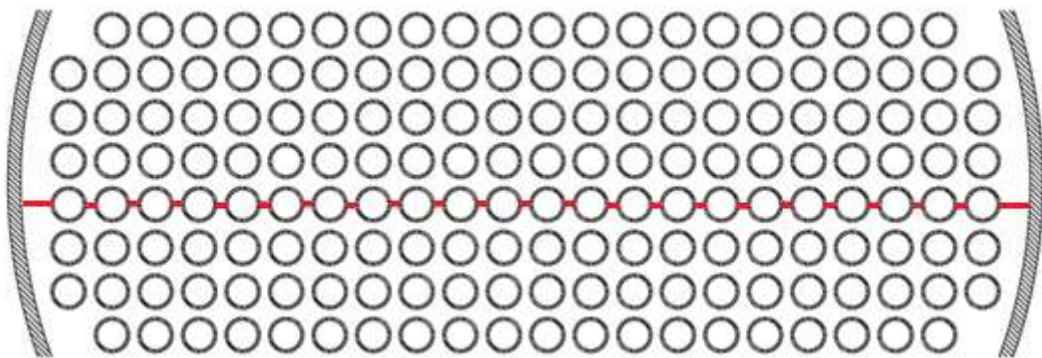
$$w_{p1} = \frac{\dot{V}_p}{S_1}$$

$$w_{p1} = \frac{0,108}{0,0304}$$

$$\mathbf{w_{p1} = 3,55 \text{ m/s}} \quad (40)$$

Výpočet rychlosti páry průchodem střední části přehříváče

Střední část výměníku je brána jako nejširší, s největším počtem trubek v jedné řadě. Tato plocha je opět tvořena součtem jednotlivých mezer mezi trubkami v dané řadě o zvolených parametrech a uvažovanou délkou těchto trubek.



Obr. č. 10 – Obrázek vyznačené největší průtočné plochy páry

- Zvolená výška trubek: $l_{tr} = 0,179 \text{ m}$
- Délka ofukované plochy: $l_{plochy} = 0,18757 \text{ m}$

$$S_2 = l_{plochy} * l_{tr}$$

$$S_2 = 0,18757 * 0,179$$

$$\mathbf{S_2 = 0,033 \text{ m}^2} \quad (41)$$

$$w_{P2} = \frac{\dot{V}_p}{S_1}$$

$$w_{P2} = \frac{0,108}{0,033}$$

$$\mathbf{w_{P2} = 3,2166 \text{ m/s}} \quad (42)$$

Výpočet střední rychlosti proudění páry ve výměníku

$$w_P = \frac{w_{P1} + w_{P2}}{2}$$

$$w_P = \frac{3,55 + 3,216}{2}$$

$$\mathbf{w_P = 3,383 \text{ m/s}} \quad (43)$$

Provedením aritmetického průměru vypočítaných rychlostí jsem získal střední rychlost proudění páry (40), tato rychlost se bude rovnat přibližně reálné hodnotě rychlosti proudění páry v předeříváči, která je jednou z podstatných parametrů k výpočtu přestupu tepla v této části předeříváče.

Výpočet hydraulického průměru proudění páry

Tento výpočet slouží k získání charakteristického rozměru, který bude uvažován ve výpočtu Reynoldsova čísla. Tímto rozměrem je hydraulický průměr proudění páry, jehož vztah je následující:

$$d_h = \frac{4 * S}{O}$$

- S.... plocha proudění páry, O..... obvod plochy

$$S = \frac{\dot{V}_p}{w_p}$$

$$S = \frac{0,108}{3,383}$$

$$S = 0,0319 \text{ m}^2 \quad (44)$$

$$l_{pl,skut} = \frac{S}{l_{tr}}$$

$$l_{plochy} = \frac{0,0319}{0,179}$$

$$l_{plochy} = 0,179 \text{ m} \quad (45)$$

$$O = (2 * l_{tr}) + (2 * l_{plochy})$$

$$O = (2 * 0,179) + (2 * 0,179)$$

$$O = 0,716 \text{ m} \quad (46)$$

$$d_h = \frac{4 * 0,0319}{0,716}$$

$$d_h = 0,178 \text{ m} \quad (47)$$

Tepelný výpočet parní části výměníku

Tepelný výpočet ochlazovací části předehřívače bude rozdílný než u části kondenzační, poněvadž podstatou výpočtu součinitele přestupu tepla v kondenzační části bylo latentní teplo páry, které hraje podstatnou roli při přenosu tepla. V ochlazovací části předehřívače je podstatnou složkou při výpočtu součinitele přestupu tepla Nusseltovo číslo, které je funkcí Reynoldsova a Prandtlova kritéria.

Nusseltovo kritérium má následující tvar:

$$Nu = c * Re^n * Pr^{0,33} * \varepsilon_s * \varepsilon_i \quad (48)$$

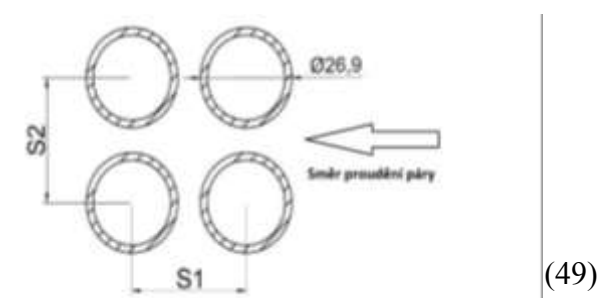
Kdy koeficient $c=0,26$ upravuje vztah pro trubky uspořádané v předehřívači za sebou, stejně jako exponent $n=0,65$. Prandtlovo číslo $Pr = 1,011$. Opravný součinitel $\varepsilon_i = 0,6$ upravuje vztah dle vlivu první řady trubek na proudění páry v předehřívači.

Opravný součinitel ε_s upravuje vztah Nusseltova kritéria podle uspořádání trubek v předehřívači a jejich vzájemných roztečí.

$$S_1 = S_2 = 1,25 \cdot d_v$$

$$S_1 = S_2 = 1,25 \cdot 0,0269$$

$$S_1 = S_2 = 0,033625 \text{ m}$$



$$\varepsilon_s = \left(\frac{S_2}{D}\right)^{-0,15}$$

$$\varepsilon_s = \left(\frac{0,03625}{0,0269}\right)^{-0,15}$$

$$\varepsilon_s = 0,967 \quad (50)$$

Výpočet Reynoldsova čísla

$$Re = \frac{w_P * d_h}{\nu_P}$$

$$Re = \frac{3,383 * 0,1782}{5,2 * 10^{-6}}$$

$$Re = 116193 [-] \quad (51)$$

$$Nu = 0,26 * 116193^{0,65} * 1,011^{0,33} * 0,967$$

$$Nu = 494 \frac{W}{m^2 * K} \quad (52)$$

Součinitel přestupu tepla

$$\alpha_P = \frac{\lambda_P * Nu}{d_h}$$

$$\alpha_P = \frac{0,03298 * 494}{0,178}$$

$$\alpha_P = 91,65 \frac{W}{m^2 * K} \quad (53)$$

Součinitel prostupu tepla

$$k = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_{KP} * d_1} + \frac{1}{2 * \lambda_{tr}} * \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_P * d_2}}$$

$$k = \frac{\pi}{\frac{1}{150,676 * 0,0229} + \frac{1}{2 * 53,5} * \ln \frac{0,0269}{0,0229} + \frac{1}{91,65 * 0,0269}}$$

$$k = 4,5 \frac{W}{m * K} \quad (54)$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_{stř} = \frac{(t_p - t_{KP2}) - (t'_p - t'_{KP1})}{\ln \frac{t_p - t_{KP2}}{t'_p - t'_{KP1}}} \cdot \psi$$

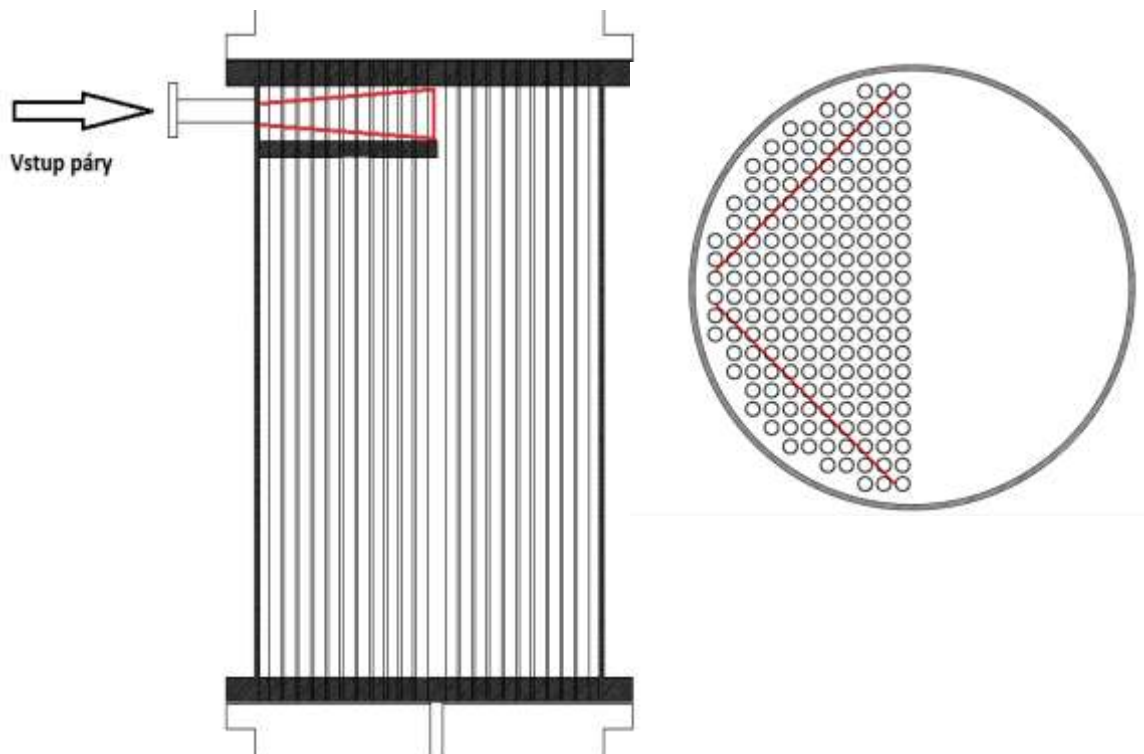
$$\Delta t_{stř} = \frac{(180 - 70) - (155 - 68,9)}{\ln \frac{180 - 70}{155 - 68,9}} \cdot 1$$

$$\Delta t_{stř} = 97,53^{\circ}\text{C} \quad (55)$$

Délka trubek ve výměníku

Při výpočtu délky trubek ochlazovací části parního předehřívače uvažují, že zmíněné ochlazování bude probíhat pouze na polovině navrženého počtu trubek, tedy 188 ks, kdy tyto trubky se nachází v prostoru, který vymezuje víko trubkovnice a přepážka oddělující zmíněnou ochlazovací a kondenzační část předehřívače. Uvažovaná výška této části je 0,179 m. Skutečná výška této části je řešena v následujícím výpočtu.

Znázornění uvažovaného proudění páry můžeme vidět na obrázku (Obr. č. 11).



Obr. č. 11 – Znázornění proudění páry v ochlazovací části předehřívače (pohled v řezu z boku a shora)

$$l_1 = \frac{Q_1}{k * \Delta t_{stř} * n_{trubek}}$$

$$l_1 = \frac{8245}{4,5 * 97,53 * 188}$$

$$l_1 = 0,1 \text{ m} \quad (56)$$

Teplosměnná plocha

$$S_1 = \pi * D * l * n_{trubek}$$

$$S_1 = \pi * 0,0269 * 0,1 * 188$$

$$S_1 = 1,587 \text{ m}^2 \quad (57)$$

Vypočítaná teplosměnná plocha představuje část parního předehříváče, sloužící k ochlazení páry z teploty 180°C na teplotu 155°C, tato plocha je tvořena svislými trubkami o délce 0,1 m a ploše 1,587 m².

Celková teplosměnná plocha trubkovnice parního předehříváče

$$S_{celk} = S_1 + S_2$$

$$S_{celk} = 1,587 + 41,433 = 43,02 \text{ m}^2 \quad (58)$$

Celková délka trubkovnice parního předehříváče

$$l_{celk} = l_1 + l_2$$

$$l_{celk} = 0,1 + 1,054 = 1,154 \text{ m} \quad (59)$$

Součtem dvou výsledných teplosměnných ploch, konkrétně ochlazovací a kondenzační části parního předehříváče, byly získány finální rozměry trubkovnice parního předehříváče. Celková délka trubkovnice a rozměry vstupních a výstupních armatur jednotlivých médií, mají zásadní vliv na finální rozměry celého parního předehříváče. Finální podobu a rozměry parního předehříváče je možno vidět ve výrobním výkresu v příloze diplomové práce.

7 Regulace parního předehříváče

Jelikož je vstupní teplota koksárenského plynu do předehříváče závislá na venkovní teplotě vzduchu, a průtokové množství koksárenského plynu závislé na kvalitě koksovaného uhlí, je poptávka po výkonu parního předehříváče proměnná. Z tohoto důvodu, a také z důvodu úspory energií je nutno tento výkon efektivně regulovat.

Nejdříve je nutno zvolit vhodný typ regulace pro tento druh výměníku tepla. Při volbě regulace vycházím ze vztahu o tepelném výkonu předehříváče:

$$Q = k \cdot l \cdot n_{tr} \cdot \Delta T \quad (60)$$

Q ...výkon předehříváče [kW], k ...součinitel prostupu tepla [$\frac{kW}{m \cdot K}$], l ...délka trubek [m], n_{tr} ...počet trubek [1], ΔT ...teplotní spád [K]

Pro volbu vhodné regulace, je nutno jeden z parametrů tohoto vztahu měnit. V následujících kapitolách je popsána změna jednotlivých veličin, a také dopad této změny na regulovaný výkon.

7.1 Regulace výkonu změnou teplotního spádu

Regulace změnou teplotního spádu, by bylo dosahováno změnou saturační teploty předehřívací páry, prostřednictvím změny jejího tlaku. Snižování tlaku předehřívací páry by bylo prováděno aplikací ventilu automatické regulace do systému zapojení parního předehříváče, konkrétně na přívodní potrubí předehřívací páry.

Pro názornou ukázkou této regulace, byl proveden výpočet změny výstupní teploty koksárenského plynu na základě změny saturační teploty páry.

Výpočet teploty koksárenského plynu na výstupu z předehříváče, bez použití regulace

Tak páry	0.55 MPa	Logaritmický teplotní spád	121.67 °C
Saturační teplota	155°C	Teplota KP na vstupu	-11°C
Délka teplosměnné plochy	1.054 m	Požadovaná teplota KP na výstupu	70 °C
Počet trubek	376 ks	Součinitel prostupu tepla	12.987 $\frac{W}{m \cdot K}$
Měrná tepelná kapacita	8,785 $\frac{kJ}{kg \cdot K}$	Průtokové množství KP	0,892 $\frac{kg}{s}$

Tab. č. 10 – Tabulka hodnot potřebných k výpočtu teploty KP na výstupu, bez použití regulace

Výpočet výkonu

$$Q = k \cdot l \cdot n_{tr} \cdot \Delta T$$

$$Q = 12,987 \cdot 1,054 \cdot 376 \cdot 121,67$$

$$Q = 626,36 \text{ kW} \quad (61)$$

Výpočet teploty KP na výstupu z předehříváče

$$t_{KP_OUT} = \frac{Q}{m_{KP} \cdot c_p} + t_{KP_IN}$$

$$t_{KP_OUT} = \frac{626,21}{0,892 \cdot 8,785} - 11$$

$$t_{KP_OUT} = 69,91 \text{ °C} \quad (62)$$

Vypočítaná teplota na výstupu koksárenského plynu z předehříváče je 69.91°C, z čehož vyplývá, že při dodržení veškerých výpočtových podmínek, na které byl předehříváč dimenzován, je dodržena i podmínka výstupní teploty 70°C.

Výpočet teploty koksárenského plynu na výstupu z předehříváče při regulaci výkonu změnou tlaku páry

Tento požadavek nastane v případě nárůstu teploty koksárenského plynu na vstupu do předehříváče. Příkladem bude změna teploty z - 11°C na teplotu 10°C

Tak páry (regulovaný)	0.35 MPa	Logaritmický teplotní spád	96,54 °C
Saturační teplota	139°C	Teplota KP na vstupu	10°C
Délka teplosměnné plochy	1.054 m	Požadovaná teplota KP na výstupu	70 °C
Počet trubek	376 ks	Součinitel prostupu tepla	12.987 $\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$
Měrná tepelná kapacita	8,785 $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	Průtokové množství KP	0,892 $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$

Tab. č. 11 – Tabulka hodnot potřebných k výpočtu teploty KP na výstupu, při použití regulace

Výpočet výkonu

$$Q = k \cdot l \cdot n_{tr} \cdot \Delta T$$

$$Q = 12,987 \cdot 1,054 \cdot 376 \cdot 96,54$$

$$Q = 496 \text{ kW} \quad (63)$$

Výpočet teploty KP na výstupu z předehříváče

$$t_{KP_OUT} = \frac{Q}{m_{KP} \cdot c_p} + t_{KP_IN}$$

$$t_{KP_OUT} = \frac{496}{0,892 \cdot 8,785} + 10$$

$$t_{KP_OUT} = 73,29 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (64)$$

Tlak páry byl regulován z původní hodnoty 0,55 MPa na hodnotu 0,35MPa. Saturační teplota poklesla na hodnotu 139°C, což vedlo ke snížení logaritmického teplotního spádu a tím snížení výkonu. Vypočítaná teplota koksárenského plynu je však vyšší než je teplota požadovaná. Z tohoto výsledku je patrné, že regulace změnou tlaku je v tomto případě nedostačující, a to z důvodu poměrně nízkého zadaného tlaku páry, čímž je velmi nízký i regulační rozsah. Aby bylo možno provádět regulaci změnou tlaku páry, musel by být předehříváč navrhnut na páru o vyšším tlaku.

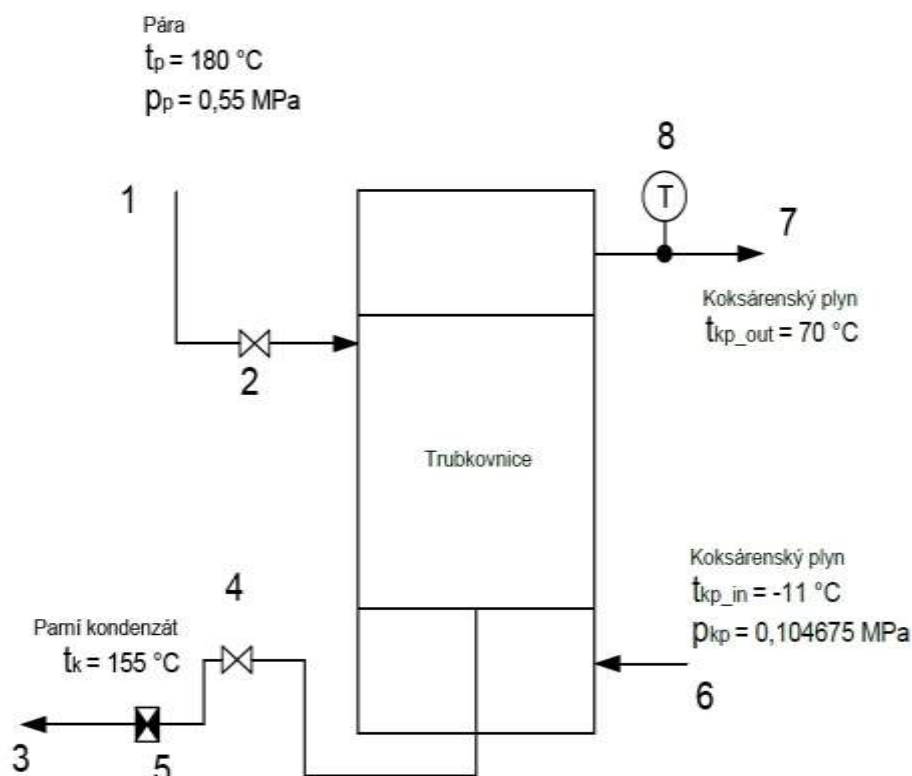
Poněvadž je dostupný tlak předehřívací páry pouze 0,55 MPa, je nutno zvolit jiný typ regulace.

7.2 Regulace výkonu parního předehříváče změnou délky teplosměnné plochy

Dalším možným typem regulace výkonu předehříváče, je změna délky teplosměnné plochy, na které dochází ke kondenzaci páry.

Pro uskutečnění tohoto typu regulace připadá v úvahu metoda zaplňování prostoru trubkovnice parním kondenzátem. Tato metoda je ve velké míře využívána u parních kotlů, kde se využívá v aplikaci ohřevu spalovacího vzduchu za pomoci páry. V tomto případě využití, dosahuje metoda velmi dobrých výsledku, a mimo jiné je velmi spolehlivá a účinná.

Pro využívání tohoto typu regulace je nutno aplikovat ventil automatické regulace do systému zapojení parního přehříváče, který by měl regulovat odvod kondenzátu z předehříváče. Tento regulační prvek, a celkové schéma zapojení parního předehříváče je možno na obrázku (Obr. č. 12).



- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1) Vstup předehřáté páry | 5) Ventil automatické regulace odvodu kondenzátu |
| 2) Uzavírací ventil předehřáté páry | 6) Přívod koksárenského plynu |
| 3) Odvod parního kondenzátu | 7) Odvod koksárenského plynu |
| 4) Uzavírací ventil odvodu kondenzátu | 8) Měření teploty koksárenského plynu na výstupu |

Obr. č. 12 – Schéma zapojení parního předehříváče

Provoz parního předehříváče při požadavku nižšího výkonu než je jmenovitý

Snížení výkonu je možno dosáhnout tak, že ventil automatické regulace (5) se přivře v rozsahu průtoku 100% - 0%, kdy by začalo docházet k zaplňování trubkovnice kondenzátem, a zároveň by tak docházelo ke snižování délky teplosměnné plochy do té doby, než by bylo dosaženo požadovaného výkonu. Tato regulace je řízena na základě měření výstupní teploty koksárenského plynu, kdy v případě nárůstu této teploty, by začalo docházet k uzavírání ventilu automatické regulace.

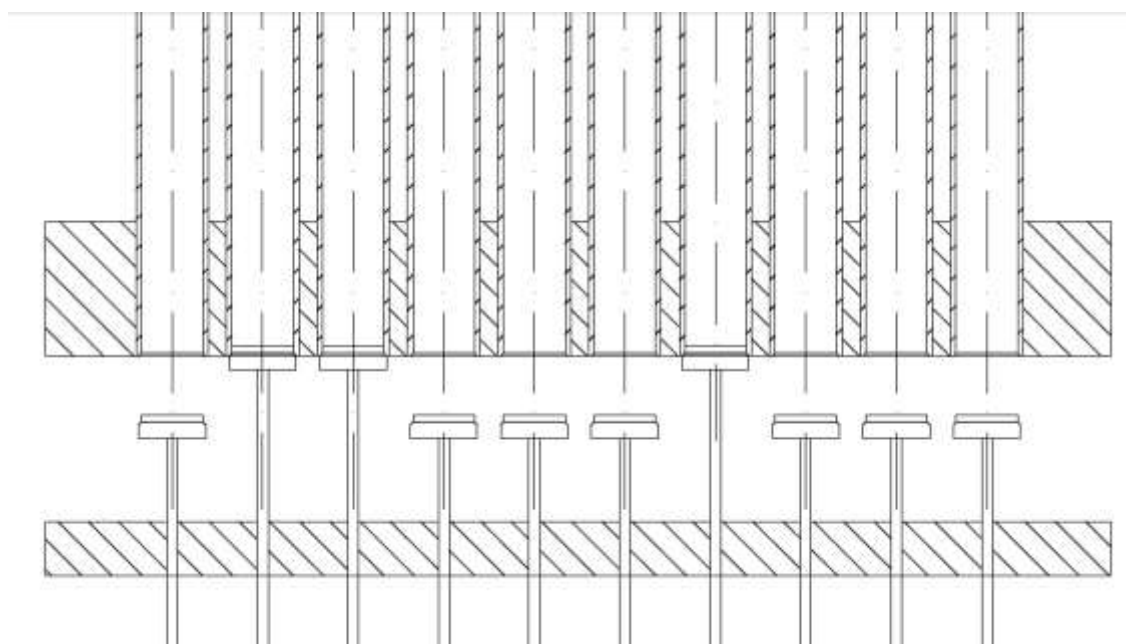
Tato metoda však s sebou nese jisté problémy, a to že by docházelo při zaplňování trubkovnice kondenzátem k podchlazování trubek v místě vstupu koksárenského plynu.

Díky tomuto podchlazování, by docházelo k podkročení kondenzační teploty dehtových a naftalenových složek v koksárenském plynu a to by vedlo k postupnému zanášení trubek, až do jejich úplného ucpání.

Aby nedocházelo k úplnému zacpání trubek, muselo by se provádět v pravidelných časových intervalech vypouštění celého objemu kondenzátu z prostoru trubkovnice. Vypuštěním kondenzátu, by opět vzrostla teplota trubek v místě vstupu koksárenského plynu, a došlo by tak k vytavení usazených dehtových a naftalenových nánosů.

7.3 Regulace výkonu snížením počtu trubek v předehříváči

Dalším možným parametrem, pomocí kterého se dá regulovat výkon, je změna počtu teplosměnných trubek předehříváče. Snižování počtu trubek, by vedlo ke snížení celkové teplosměnné plochy. Této změny by mohlo být dosaženo postupným zaslepováním teplosměnných trubek pomocí sedlových ventilů. Ventily, by bylo nutno umístit na víko trubkovnice na straně vstupu koksárenského plynu do trubkovnice, a to z důvodu, aby stejně jako u předchozí regulace nedocházelo k podchlazování trubkovnice, a snižování teploty v prostoru kondenzace. Možné konstrukční provedení zaslepování trubek, je vidět na obrázku (Obr. č. 13).



Obr. č. 13 – Regulační sedlové ventily zaslepující teplosměnné trubky parního předehříváče

Tato varianta regulace se zdá byt poměrně účinná, poněvadž je zde patrné, že rozsah regulace je stejně velký jako u regulace zaplňování prostoru trubkovnice kondenzátem. Ale jak je možno vidět z obrázku (Obr. č. 10), je konstrukční provedení této regulace poměrně složité, a obsah látek v koksárenském plynu jako je naftalen a dehet, by svou kondenzací mohl negativně ovlivňovat funkčnost veškerých pohyblivých částí této regulace.

Z těchto důvodů jsem se rozhodl použít pro navrhovaný parní přehřívač koksárenského plynu, regulaci založenou na změně délky teplosměnné plochy, tedy variantu zaplňování prostoru trubkovnice parním kondenzátem.

8 Závěr

Tato diplomová práce obsahuje kompletní návrh výměníku tepla, který slouží k ohřevu koksárenského plynu pomocí páry, nad teplotu rosného bodu naftalenu a dehtu. Tyto složky koksárenského plynu zapříčiňují vznik usazenin v potrubní síti.

Návrhem je rekuperační protiproudý výměník o trubkovém koncepčním uspořádání, ve kterém dochází k ohřevu koksárenského plynu vlivem kondenzace páry.

Parní přehříváč je v tomto případě tvořen ze dvou částí a to z části kondenzační, ve které dochází k hlavnímu sdílení tepla a z části ochlazovací, která slouží k ochlazení páry na saturační teplotu. Práce obsahuje celkovou výpočtovou dokumentaci, díky které byly získány parametry potřebné ke stanovení teplosměnné plochy.

Další podstatnou částí práce byl návrh vhodné regulace parního přehříváče, která má měnit jeho výkon na základě změny provozních podmínek. Z několika řešených variant regulace výkonu byla nakonec vybrána regulace založená na změně délky teplosměnné plochy vlivem zaplňování trubkovnice parním kondenzátem.

Možnou optimalizací mého návrhu parního přehříváče koksárenského plynu by bylo v přívodu páry do prostoru trubkovnice. V tomto návrhu by pára byla přivedena do trubkovnice ze shora, tedy v rovnoběžném směru s trubicí odvádějící kondenzát. Rozdíl oproti současnému stavu by byl ve změně typu obtékání teplosměnných trubek parou. Obtékání by bylo podélné po celé délce trubkovnice, díky čemuž by odpadla nutnost zabývat se ochlazováním páry na saturační teplotu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KADLEC, Zdeněk. *Průvodce sdílením tepla pro požární specialisty*. 1. vyd. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2009, 100 s. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 978-80-7385-061-6.
- [2] BLAHOŽ, Vladimír a Zdeněk KADLEC. *Základy sdílení tepla*. 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 1996, 109 s. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 80-902001-1-7.
- [3] DVOŘÁK, Zdeněk. *Výměníky tepla: (pro hydraulické a pneumatické stroje)*. Vyd. 3. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1992, 121 s. ISBN 80-01-00808-8.
- [4] ŠEBELÍK, Vladimír. *Koksárenství v Českých zemích a na Slovensku*. 1. vyd. Hutní projekt Frýdek – Místek. Česká koksárenská společnost 1996, ISBN –
- [5] KOZINA, Antonín a Miroslav Píša. *Základy koksárenství* (Příručka pro nižší a střední technické kádry). Praha 1956. Státní nakladatelství technické literatury, ISBN –
- [6] PÍŠA, Miroslav. *Výroba koku* (Vydání druhé, přepracované a doplněné). Praha 1978. Státní nakladatelství technické literatury, ISBN –
- [7] BROŽ, Ludvík. *Hutnictví železa*. Praha 1988. Státní nakladatelství technické literatury, ISBN –

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

- Obr. č. 1 Velkokapacitní koksárenská baterie se sypaným provozem
- Obr. č. 2 Koksárenská baterie s pýchovaným provozem
- Obr. č. 3 Schéma koksochemie
- Obr. č. 4 Rekuperační výměník tepla (trubkový)
- Obr. č. 5 Regenerační výměník tepla typu Ljungstrom
- Obr. č. 6 Bilance parního předehřívače
- Obr. č. 7 Bilance horkovodního předehřívače
- Obr. č. 8 Průběh teploty médií v závislosti na délce teplosměnné plochy
- Obr. č. 9 Obrázek vyznačené nejmenší průtočné plochy páry
- Obr. č. 10 Obrázek vyznačené největší průtočné plochy páry
- Obr. č. 11 Znázornění prodění páry v ochlazovací části předehřívače (pohled v řezu z boku a shora)
- Obr. č. 12 Schéma zapojení parního předehřívače
- Obr. č. 13 Regulační sedlové ventily zaslepující teplosměnné trubky parního předehřívače

SEZNAM TABULEK

- Tab. č. 1 Průměrné prvkové složení koksárenského plynu
- Tab. č. 2 Hodnoty fyzikálních vlastností jednotlivých složek koksárenského plynu
- Tab. č. 3 Tabulka vypočítaných fyzikálních vlastností koksárenského plynu
- Tab. č. 4 Tabulkové hodnoty fyzikálních vlastností páry a kondenzátu
- Tab. č. 5 Tabulkové hodnoty fyzikálních vlastností horké tlakové vody
- Tab. č. 6 Tabulka charakterizující trubky parního předehřívače
- Tab. č. 7 Tabulka sloužící k volbě opravného součinitele pro krátké trubky ε_L
- Tab. č. 8 Tabulka fyzikálních vlastností kondenzátu za určující teploty
- Tab. č. 9 Tabulka fyzikálních vlastností páry za určující teploty
- Tab. č. 10 Tabulka hodnot potřebných k výpočtu teploty KP na výstupu, bez použití regulace
- Tab. č. 11 Tabulka hodnot potřebných k výpočtu teploty KP na výstupu, při použití regulace